



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405984

引用格式:史叶诚,赵富强,耿振钟,等.操作参数对质子交换膜燃料电池阴极侧壁缩型流道性能的影响[J].科学技术与工程,2025,25(21):8914-8925.

Shi Yecheng, Zhao Fuqiang, Geng Zhenzhong, et al. Influence of operating parameters on the performance of cathode sidewall shrinkage runners in proton exchange membrane fuel cell[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(21): 8914-8925.

操作参数对质子交换膜燃料电池阴极侧壁缩型流道性能的影响

史叶诚¹, 赵富强^{1*}, 耿振钟¹, 王宏伟²

(1. 太原科技大学高端重型机械装备研究院, 太原 030024; 2. 太原理工大学山西省煤矿智能装备工程研究中心, 太原 030024)

摘要 质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)阴极流道作为氧化剂还原的场所,流道构型和操作参数相互作用是提升电池性能的关键之一。针对PEMFC侧壁缩型流道对操作参数的设计需求,建立了一个采用阴极侧壁缩型流道的三维质子交换膜电池模型,研究了在不同温度、压强和阴极化学计量比下,电化学性能、膜表面温度分布及含水量分布的变化规律。研究表明:操作参数不变时,脊背中线、流道中线的电流密度曲线呈脉冲式波动,膜表面温度曲线、膜表面水含量曲线呈现规律性波动,且脊背中线处的电流密度、温度、水含量明显高于流道中线处;操作参数变化下,当温度从50℃升高到80℃时,电流密度从0.822 A/cm²增大至0.856 A/cm²,提高了4.1%;当压强从0.1 MPa增大至0.3 MPa时,电流密度从0.860 A/cm²增大至1.500 A/cm²,提高了74.4%;当阴极化学计量比从10增大至90时,电流密度从1.502 A/cm²提升至1.568 A/cm²,提高了4.4%。进一步建立了基于组合赋权法和改进雷达图法的PEMFC输出性能评价方法,得到操作参数在压强0.25~0.3 MPa、温度70~80℃、化学计量比70~90范围下,阴极的侧壁缩型流道表现出优异输出性能。

关键词 质子交换膜燃料电池;操作参数;侧壁缩型流道;电化学性能;综合评价

中图分类号 TK91; **文献标志码** A

Influence of Operating Parameters on the Performance of Cathode Sidewall Shrinkage Runners in Proton Exchange Membrane Fuel Cell

SHI Ye-cheng¹, ZHAO Fu-qiang^{1*}, GENG Zhen-zhong¹, WANG Hong-wei²

(1. High-end Heavy Machinery and Equipment Research Institute, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Center of Shanxi Engineering Research for Coal Mine Intelligent Equipment, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

[Abstract] The cathode flow channel of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) serves as the site of oxidant reduction, and the interaction of the flow channel configuration and operating parameters is one of the keys to enhance the performance of the cell. A three-dimensional proton exchange membrane cell model with cathode sidewall shrinkage runner was established to meet the design requirements of PEMFC sidewall shrinkage runner regarding the operating parameters. The changing rules of electrochemical performance, temperature distribution on the membrane surface and water content distribution were investigated under different temperatures, pressures and cathode stoichiometric ratios. It is shown that under the constant operating parameters, the current density curves of the ridge centerline and the flow channel centerline are impulsively fluctuated, and the temperature curves of the membrane surface and the water content curves of the membrane surface are regularly fluctuated. The current density, temperature and water content at the ridge centerline are obviously higher than those at the flow channel centerline. Under the change of operating parameters, when the pressure is increased from 0.1 MPa to 0.3 MPa, the current density is increased from 0.860 A/cm² to 1.500 A/cm², with an increase of 74.4%. When the temperature is increased from 50℃ to 80℃, the current density is increased from 0.822 A/cm² to 0.856 A/cm², with an increase of 4.1%. And when the cathode stoichiometry ratio is increased from 10 to 90, the current density is increased from 1.502 A/cm² to 1.568 A/cm², with an increase of 4.4%. Furthermore, a PEMFC output performance evaluation method based on the combined assignment method and the improved radar diagram method has been established. The cathode sidewall-retracted proton ex-

收稿日期: 2024-08-09 修订日期: 2025-04-11

基金项目: 山西省科技重大专项计划(202101070301011);山西省科技计划揭榜招标项目(20201101020)

第一作者: 史叶诚(2000—),男,汉族,江苏常州人,硕士研究生。研究方向:氢燃料电池设计制造与应用技术。E-mail: 13861095132@163.com。

*通信作者: 赵富强(1981—),男,汉族,山西太原人,博士,教授。研究方向:氢燃料电池设计制造与应用技术。E-mail: zfqgear@163.com。

change membrane fuel cell is shown to exhibit excellent output performance under the operating parameters of 0.25 ~ 0.3 MPa, 70 ~ 80 °C and the stoichiometric ratio in the range of 70 ~ 90.

[**Keywords**] proton exchange membrane fuel cell; operating parameters; sidewall shrinkage runner; electrochemical performance; comprehensive evaluation

质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 因其具有高能量密度、转换效率高、可再生以及环保等优点被中外视为最具发展潜力的新型能源电池技术^[1-3]。在相同铂含量条件下, 电池性能不仅与流道内部反应物流体动力学和传质作用有关系, 更受到阴阳极流道构型、操作参数直接影响。而 PEMFC 阴极流道作为电池内部进行氧化剂还原的场所, 分析流道构型和操作参数对其内部性能的影响是研究热点。

PEMFC 在运行过程中会对各个操作参数进行控制, 例如温度、压强以及化学计量比等^[4-5], 合理的设置操作参数能够有效提高电池的性能。目前, 中外已经对不同流道种类下, 操作参数对 PEMFC 性能的影响进行了大量研究。刘鑫桐等^[6]探究了蛇形流道在电流阶跃变化中相对湿度和工作温度之间的耦合变化对电池性能的影响, 得出其最佳工作温度为 60 °C。孙峰等^[7]针对不同阴极压力下的 PEMFC 极化曲线进行了仿真和实验测试, 研究获得 PEMFC 输出功率最大时的阴极压力为 70 kPa。李楠等^[8]提出了一种圆形交错迷宫式流道, 研究表明该新型流道在 0.4 V 电压下, 电流密度相较于矩形交错式流道和蛇形流道提升明显。蒙先攀等^[9]针对多平行蛇形 PEMFC 分析不同操作参数及各参数耦合对燃料电池性能的影响, 研究发现当电压为 0.5 V、散热率为 60 W/(m²·K)、操作压力为 303.975 kPa 时, 电流密度最大, 达到 0.81 A/m。Jin 等^[10]针对三通道蛇形 PEMFC 分析电池性能对工作压强、温度的敏感性, 得到关键操作参数的最优组合: 压强为 2.566 atm、操作温度为 87.71 °C, 其中 1 atm = 101.325 kPa。Yang 等^[11]研究阴极 PEMFC 的水传输机制和局部水分布, 通过对各操作参数下的电池输出性能比较, 确定实验 PEMFC 性能最佳时电池温度为 45 °C。

变截面流场是从流道的高度、宽度等方向通过改变流道截面积大小, 进而改变流道内反应气体的浓度和速度, 以有效提高反应气体利用率, 避免电池内水淹现象^[12], 这种流道构型为改善电池综合性能提出了新思路。Zhao 等^[13]发现变截面阶梯流场会使 PEMFC 峰值功率密度得到明显提升, 但是并未证实该流道具有良好的传质能力和电流密度分布。Li 等^[14]研究了蛇形流道中添加变截面对 PEMFC 性能的影响, 发现通过改变蛇形流道的内截

面会增加 PEMFC 的电流密度, 但也会降低电流密度分布的均匀性。Ramin 等^[15]通过在直流通表面设置陷阱形状构型改变流道截面, 发现不仅增强了反应气体向催化层的扩散能力, 所提出的陷阱形状通道还显著提高了电池功率密度。侧壁缩型流场是在流道中设置流道收缩面, 改变流道内反应气体压力的局部变截面流场, 当反应气体到达阴极侧壁缩型特征构型时, 由于流道截面的改变, 使得反应气体在此处的浓度提升, 促使反应气体的扩散, 加强了流道内反应气体对流传质作用, 提高气体利用率, 进而提高电池输出性能。上述研究揭示了不同流道构型下最优电池性能所对应的操作参数设置不同这一规律, 表明了操作参数和流道构型存在耦合作用关系。

为了探究在侧壁缩型流道构型下电池性能与操作参数之间的内在规律, 现对阴极具有侧壁缩型变截面构型的 PEMFC 开展研究, 通过建立燃料电池仿真模型, 分析不同操作参数 (温度、压强、阴极化学计量比) 下电池的电化学性能、膜表面温度分布以及含水量分布的变化情况, 并对燃料电池进行综合性能评价, 得到燃料电池阴极侧壁缩型流道的最佳操作参数条件。

1 侧壁缩型流道电池模型

PEMFC 侧壁缩型流道模型由阴极流道、阴极扩散层、阴极催化层、质子交换膜、阳极催化层、阳极扩散层以及阳极流道共 7 个部分组成, 其中, 阴极流道采用侧壁缩型流道, 阳极流道采用三蛇型流道, 如图 1 所示。

PEMFC 以电化学反应的方式将反应物中的化学能转换成电能, 进而通过机械传输转变为机械能。氢气作为燃料通过阳极蛇形流道通入流道内, 通过扩散层到达催化层, 在催化层氢气被分解成 H⁺ 和 e⁻, H⁺ 在质子交换膜中迁移到达阴极催化层中与阴极侧壁缩型流道流入的 O₂ 进行反应生成 H₂O, 而 e⁻ 则通过外电路达到负载进行做功, 完成电化学反应, 模型的结构尺寸如表 1 所示。

PEMFC 电化学分析通过一系列的控制方程对模型进行数值模拟, 其中包括质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、组分守恒方程以及多组分气相扩散方程。在数值模拟中各计算域控制方程^[12]如表 2 所示。

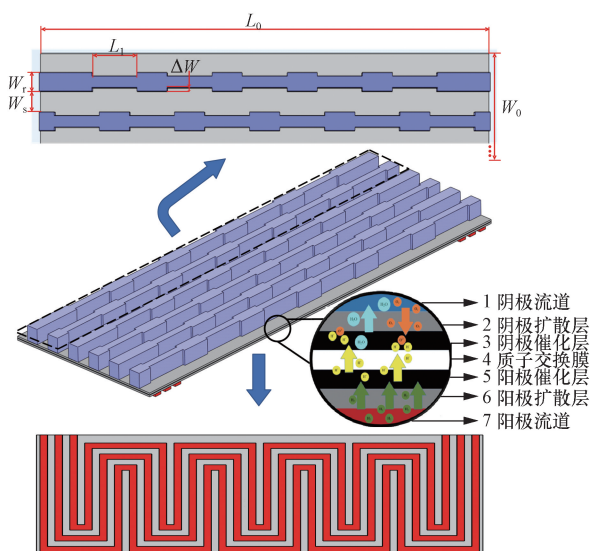


图1 侧壁缩型流道模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of sidewall shrinkage flow channel model

表1 模型结构尺寸

Table 1 Model structure size

参数	值
双极板长度 L_0 /mm	60
双极板宽度 W_0 /mm	27.2
电池有效面积/mm ²	1 632
阴极扩散层厚度/mm	0.25
阴极催化层厚度/mm	0.01
阴极流道高度/mm	2
阴极流道宽度 W_c /mm	1.6
阴极脊柱宽度 W_s /mm	1.8
侧壁缩小特征长度 L_1 /mm	6
质子交换膜厚度/mm	0.018
阳极扩散层厚度/mm	0.018
阳极催化层厚度/mm	0.25
阳极流道高度/mm	0.002 5
阳极流道宽度/mm	0.035
阳极脊柱宽度/mm	1
缩进 ΔW /mm	0.3

表2 各计算域控制方程

Table 2 Control equation of each calculation domain

控制方程	公式	参数含义
质量守恒方程	$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\rho\mathbf{u}) = S_m$	ε 为多孔介质率; ρ 为流体的密度, kg/m ³ ; t 为时间, s; ∇ 为哈密尔顿算子; \mathbf{u} 为流体速度矢量, m/s; S_m 为物质 m 的质量源项, kg/(m ³ ·s)
动量守恒方程	$\frac{\partial(\varepsilon\rho\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\rho\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\varepsilon\nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon\mu\nabla\mathbf{u}) + S_u$	p 为反应气体压力, Pa; μ 为动力黏度, Pa·s; S_u 为动量源项, N/m ³
能量守恒方程	$\frac{\partial(\varepsilon\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\rho c_p \mathbf{u}T) = \nabla \cdot (k^{\text{eff}}\nabla T) + S_Q$	c_p 为定压比热容, J/(kg·K); T 为工作温度, K; k^{eff} 为有效热导率, W/(m·K); S_Q 为能量源项, W/m ³
组分守恒方程	$\frac{\partial(\varepsilon c_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\mathbf{u}c_k) = \nabla \cdot (D_k^{\text{eff}}\nabla c_k) + S_k$	c_k 为组分摩尔浓度, mol/m ³ ; D_k^{eff} 为组分有效扩散系数, m ² /s; S_k 为组分源项, kg/(m ³ ·s)
多组分气相扩散方程	$\nabla x_i = \sum_{j=1}^n \frac{RT}{\rho D_{ij}^{\text{eff}}}(x_i N_j - x_j N_i)$	x_i 和 x_j 分别表示 i 组分和 j 组分的摩尔分数; N_i 和 N_j 分别表示 i 组分和 j 组分的质量通量, kg/(m ² ·s); D_{ij}^{eff} 表示 i 和 j 组分的二元扩散系数, m ² /s; R 为理想气体常数, J/(kg·K)

1.1 模型假设

采用多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics 建立 PEMFC 数值模型,主要参数设置如表 3 所示。由于 PEMFC 在实际工作过程中受诸多因素的影响,模型的建立和计算过程十分复杂,在保证模拟结果正确前提下,需要对模型做合理假设:①质子交换膜不能传递阴、阳极反应气体;②多孔介质为各向同性且为匀质状态;③忽略重力影响;④忽略 PEMFC 内部产生的液态/气态水的相变散热;⑤电池内部热量主要由热传导完成,并且在流道边界处发生对流传热^[16]。

1.2 模型验证

为了确保 COMSOL 软件仿真计算结果的准确性和有效性,选取侧壁缩型流道模型进行网格独立

性验证。利用有限元网格划分模块将模型划分为不同网格密度的正六面体单元,选取膜表面处的电流密度进行评价,结果如表 4 所示,与网格 2 相比,网格 3 增加近两万个数值单元,计算单元电流密度值偏差为 0.23%,可忽略不计。由此可见网格密度对于仿真结果的影响可以忽略不计,结果采用网格 3 正六面体单元格进行后续数值计算。

1.3 实验验证

为验证仿真模型的准确性,采用空冷型电堆进行实验测试,燃料电池电堆双极板片数 40 片,电堆重量 3.45 kg,泄露速率 5~7 kPa/min,电堆运行后一段时间进行数据采集,电堆原理及测试、实验验证结果如图 2、图 3 所示,通过对比实验值与仿真值

表3 PEMFC 物性参数和操作条件
Table 3 PEMFC physical parameters and operating conditions

参数	值
气体扩散层孔隙率	0.4
气体扩散层渗透率/ m^2	1.18×10^{-11}
气体扩散层电导率/ $(S \cdot m^{-1})$	222
电极催化层相的体积分数	0.3
薄膜电导率/ $(S \cdot m^{-1})$	9.825
气体扩散层的导热系数/ $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	1.2
催化剂层导热系数/ $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	1.5
质子交换膜导热系数/ $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	0.95
气体扩散层密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	2 719
催化剂层密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	2 719
质子交换膜密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	1 980
气体扩散层的比热容/ $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	568
催化剂层比热容/ $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	3 300
质子交换膜比热容/ $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	833
阴极/阳极湿度/%	30

表4 网格独立性验证
Table 4 Grid independence validation

网格	网格数量/个	电压 = 0.5 V	
		电流密度/ $(A \cdot cm^{-2})$	相对误差/%
网格 1	72 279	0.717 8	5.62
网格 2	129 764	0.758 2	0.23
网格 3	157 824	0.756 4	—

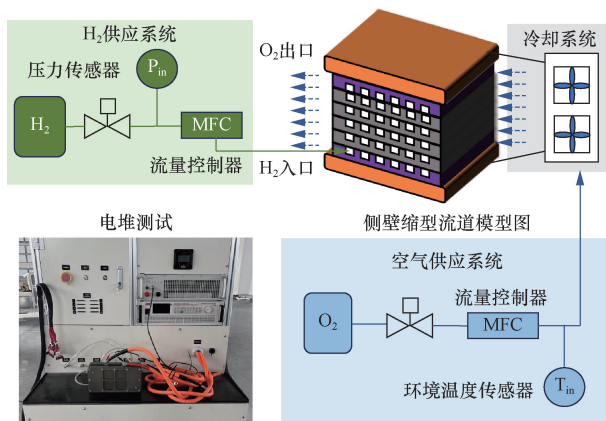


图2 实验测试
Fig. 2 Experimental test

两者电流-电压曲线,其结果吻合度较好,验证了模型的有效性。两者产生微小误差的原因是多因素耦合,例如实验环境中气压的波动、电磁干扰导致的数据采集系统延迟响应等。

2 仿真结果分析

2.1 温度对电池性能的影响

2.1.1 电化学性能

图4为不同温度下电池的极化曲线与功率密度

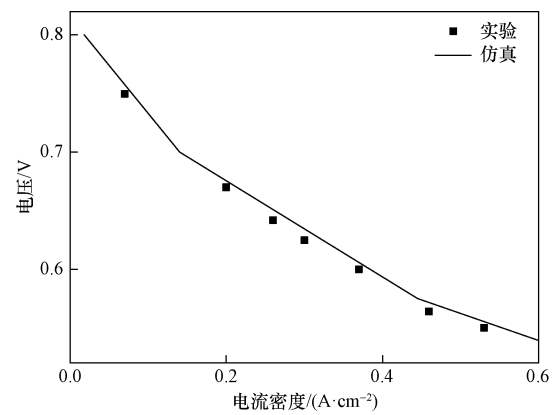


图3 模型验证
Fig. 3 Model verification

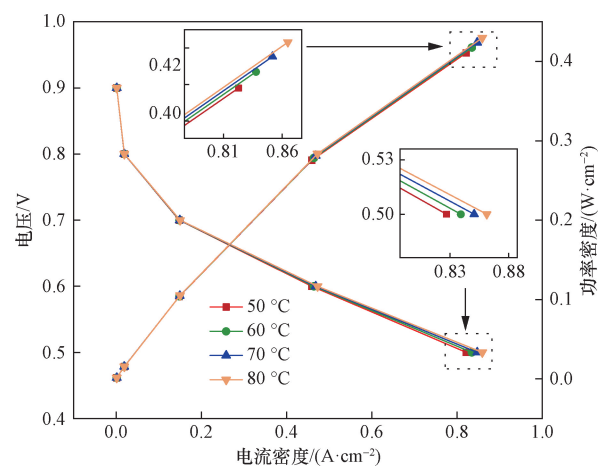


图4 温度对电池性能影响
Fig. 4 Effect of temperature on battery performance

曲线,随着温度从50℃升高到80℃,电池电流密度与功率密度随着温度的增加而增大,提升了4.1%,这是由于温度升高,催化剂活性加强,电池膜上电导率提高,电池内反应加快,电流密度得到提升。在低电流密度区域,电池处于活化极化损失工作区域,随着温度的提高,活化损失变化不明显,可以忽略不计;而在中电流密度区域^[17],欧姆极化损失占据主要因素,由于质子交换膜的电导率与欧姆内阻成反比,随着温度升高,欧姆内阻逐渐减小,欧姆损失电压逐渐减小,导致电流密度增加幅度略微降低。

0.5 V工作电压下,膜电极表面不同截线处电流密度分布曲线如图5所示。图5(a)展示了两处截线位置,其中A处截线为阴极脊背中线位置,B处截线为阴极流道中线位置,后续均以此截线位置为例分析,图5(b)中阴影区对应流道侧壁缩型特征部分,其余区域为流道部分。总体上看,随着温度的升高,各截线位置平均电流密度均提升,但提升幅度较小,同时沿着流道进出口端方向,各截线上电流密度呈脉冲式波动。

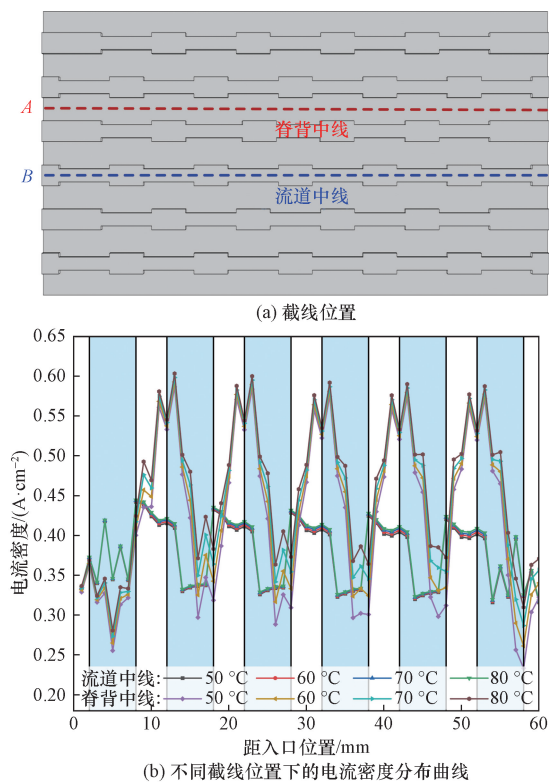


图5 截线位置以及不同截线位置下的电流密度分布曲线
Fig. 5 Current density distribution curves at cutoff positions and at different cutoff positions

在脊背中线 A 处, 电流密度变化十分明显, 这是由于背中线处受到的对流传质作用较强, 电流密度在流道区域达到一个局部峰值, 同时沿着流道出口端方向, 在侧壁缩型特征始端达到最高峰值并呈下降趋势, 最后在侧壁缩型特征末端达到局部谷值并呈上升趋势, 这是由于侧壁收缩特征改变了流道横截面积, 导致电流密度双峰值的出现, 说明侧壁缩型特征构型能够让电流密度有很明显的提高。其中在侧壁缩型特征始端处, 横截面积由大变小、流道内气体压力增大, 气体流速变快, 加大了电化学反应程度; 而在侧壁缩型特征末端横截面积由小变大、气体流速变慢, 此时温度对于反应程度有很大影响, 且随着温度的升高, 电流密度有明显的变化。相较于流道中线 B 位置, 随着温度的提升, 电流密度幅度没有太大的变化。

2.1.1.2 膜表面温度分布

0.5 V 工作电压下, 膜电极表面不同温度下各截线处温度分布曲线如图 6(a) 所示。从整体上看, 膜表面温度没有很明显的变化, 随着温度的升高, 膜表面温度曲线随着侧壁缩型流道特征处的交替排布而呈现规律性的波动, 且脊背中线的温度明显高于流道中线, 这是由于伴随温度的升高, 气体的扩散能力增强, 电池内部的电化学反应速率提高, 此

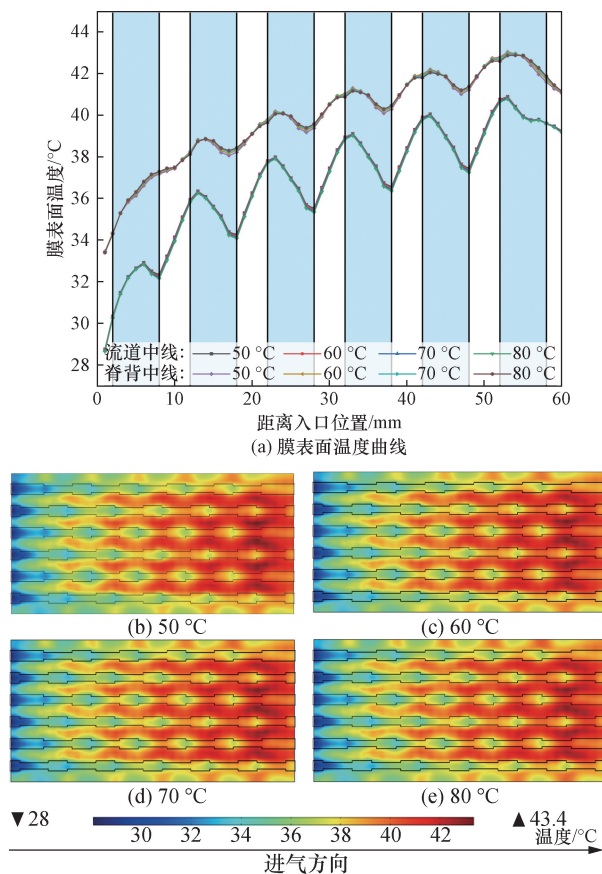


图6 不同温度下膜表面温度分布图
Fig. 6 Temperature distribution of membrane surface at different temperatures

处温度相对较高。在脊背中线 A 处, 随着温度提升, 膜表面平均温度仅仅由 39.87 °C 提升至 39.9 °C, 膜表面温度在侧壁缩型特征始端达到局部峰值, 在特征末端达到局部谷值; 而流道中线 B 位置, 膜表面温度变化程度相对较大, 这是由于当电池温度升高时, 会导致分子的活性提高, 且催化剂的活性也会提高, 产生的热量也就更多, 膜内的温差更大。

2.1.1.3 水含量分布

0.5 V 工作电压下, 膜电极表面不同温度下各截线处水含量分布曲线如图 7(a) 所示。总体上看, 随着温度的升高, 各截线位置膜表面水含量均有小幅度的提升, 脊背处水含量明显高于流道处, 同时沿着流道进出口端方向, 各截线上膜表面水含量变化规律相似。其中, 在脊背中线 A 处, 水含量变化十分明显, 这是由于随着温度的升高, PEMFC 反应越来越剧烈, 生成大量液态水, 并且发现在流道出口处的水含量明显高于入口处, 这是由于电池冷却系统将反应所产生的水沿着流道向出口方向聚集; 而在流道中线 B 位置, 此处的水含量变化幅度较小, 这是由于流道中线处气体反应产生大量热, 生成的水一部分以气体的形式蒸发, 导致水含量减小。

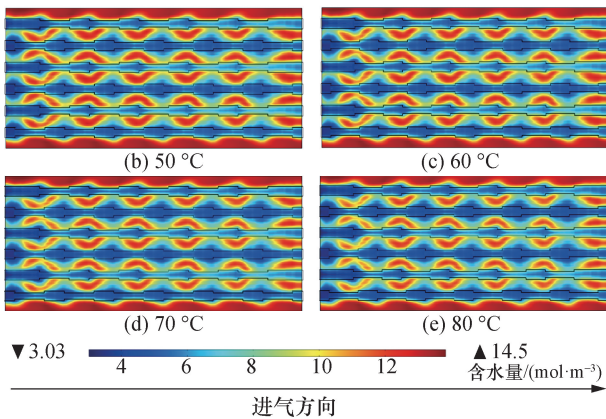
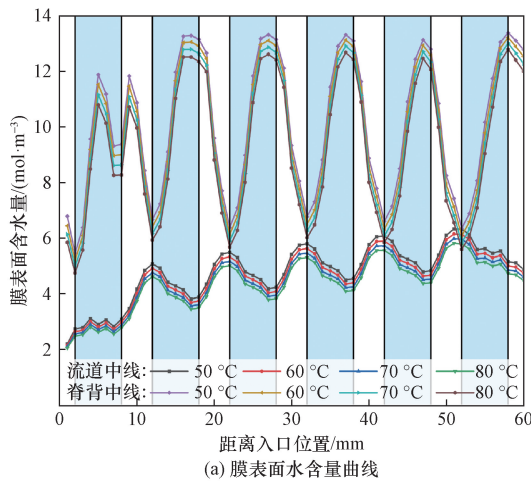


图7 不同温度下膜表面水含量分布图

Fig. 7 Distribution of water content on membrane surface at different temperatures

2.2 压强对电池性能的影响

压强是影响 PEMFC 输出性能的一个重要因素,压强过大可能导致膜电极水含量过多,降低气体扩散层有效孔隙率,压强过低又不利于反应产物水的排出^[12]。因此需要确定最佳的压强设置范围,使得电池能够表现出优异性能,设置压强范围为 0.1 ~ 0.3 MPa。

2.2.1 电化学性能

不同压强下电池的极化曲线与功率密度曲线如图 8 所示。随着电压提升,PEMFC 的电流密度逐渐减小,当压强从 0.1 MPa 升高到 0.3 MPa,电池电流密度从 0.860 A/cm²提升至 1.500 A/cm²,提高了 74.4%。电池的功率密度随电压的提升逐渐增大,功率密度从 0.430 W/cm²提升至 0.750 W/cm²,提高了 74.4%,二者均有一个明显的提升,一方面是由于当 PEMFC 的温度保持一定时,电池中水分气化的速度随着压力的升高而降低,导致膜中的水含量相对增加,质子拥有更快的传递速度^[18];另一方面是由于反应气体分子运动剧烈,导致 PEMFC 的开路电压增大,提高了电池输出性能。压强对 PEMFC

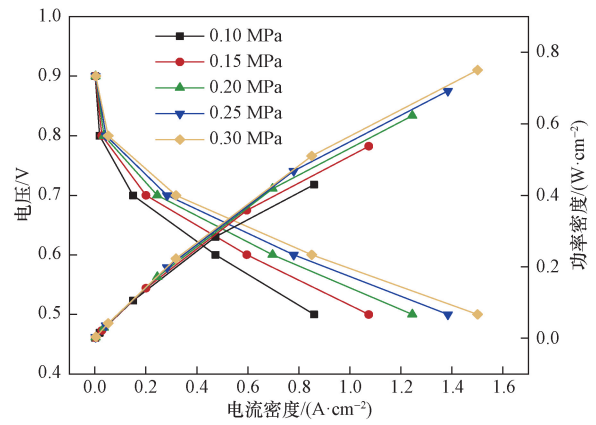


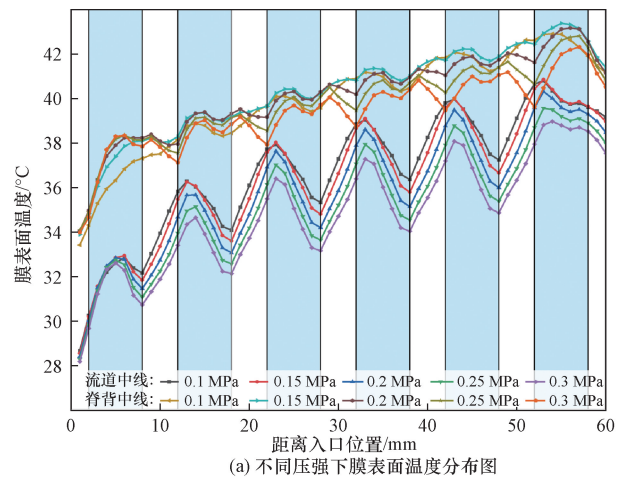
图8 压强对电池性能影响

Fig. 8 Effect of pressure on battery performance

的输出特性在低电流密度区域影响较小,但在中高电流密度下影响较大,这是由于压力大提升会增大气体在电池内部的扩散速率,加剧电化学反应,进而提高电池的输出性能。

2.2.2 膜表面温度分布

0.5 V 工作电压下,膜电极表面不同压强下各截线处温度分布曲线如图 9(a) 所示。总体上看,随



(a) 不同压强下膜表面温度分布图

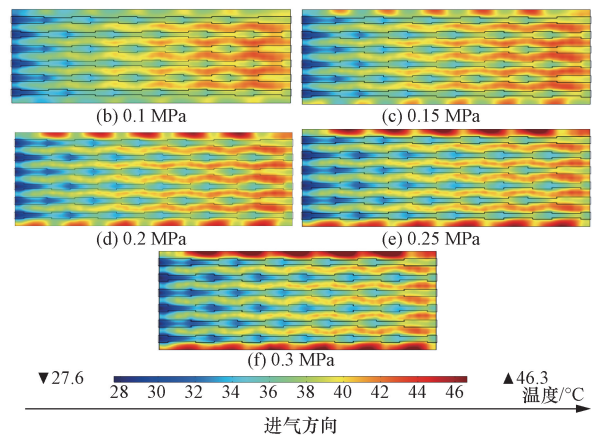


图9 不同压强下膜表面温度分布图

Fig. 9 Temperature distribution of membrane surface at different pressures

着压强的升高,各截线位置膜表面温度均降低,流道中线处的膜表面温度变化最为明显,这是由于随着电池压强升高,流道内部反应气体扩散性能提升、流速增大,气体流动带走了大部分热量,使得此位置温度相对较低。

2.2.3 水含量分布

0.5 V工作电压下,膜电极表面不同压强下各截线处水含量分布曲线如图 10(a)所示。从总体上看,压强的提升对于流道以及脊背处的水管理有很大的影响,随着压强的增大,各截线位置水含量均有提升,这是因为当温度一定时,水的饱和蒸气压强不变,随着工作压强的增大,水的蒸发降低,导致质子交换膜内水含量相对增加,从而改善了膜内的质子传递速率,加剧了电化学反应。其中,电池脊背中线上水含量普遍要高于流道中线,并且在脊背处水含量有明显的聚集现象,这是因为侧壁缩型流道的设计增强了脊背处的对流传质作用,使得反应生成的水增加。

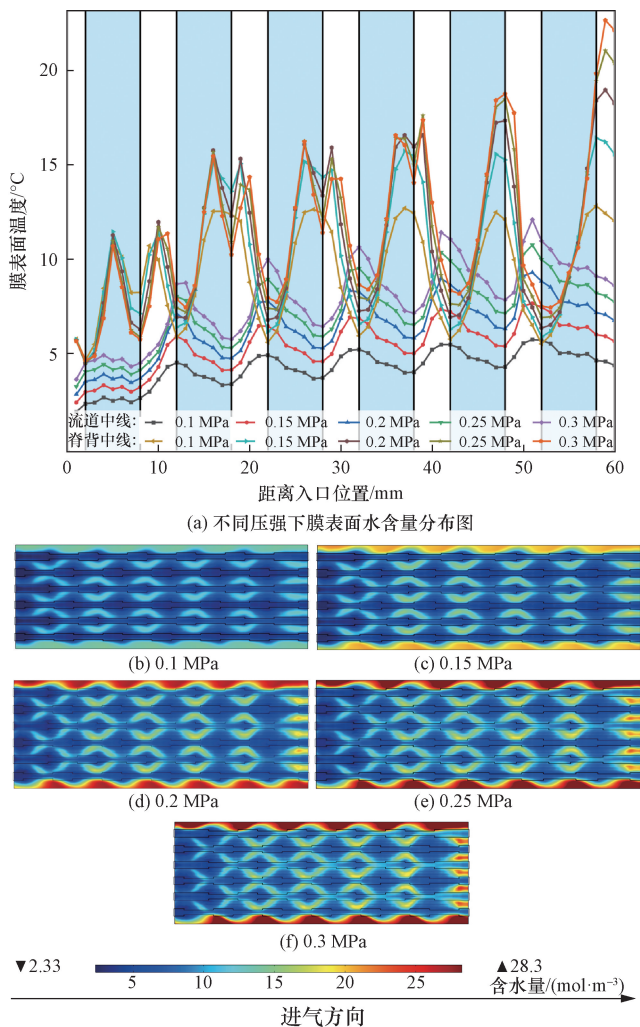


图 10 不同压强下膜表面水含量分布图
Fig. 10 Distribution of water content on the membrane surface at different pressures

综上所述,相较于不同电池温度对电池性能影响,不同压强对电池性能的影响更加明显。对比不同压强下的膜表面电流密度、温度、含水量各个参数可以得出:随着压强升高,电池内部传质性能提高,膜表面电流密度分布升高;电池内部散热速率提高,膜表面温度逐渐降低;电池内部传质性能提高。总体来看,随着电池压强的提高,电池性能相应提高,电池压强在 0.25 ~ 0.3 MPa 时表现出较好的电池输出性能。

2.3 阴极化学计量比对电池性能的影响

化学计量比也是影响电池输出性能的一个重要参数,阴极化学计量比概念,增大化学计量比,会使 PEMFC 阴阳极气体流量增加,进而增强电池内部反应,但化学计量比过高,会使质子交换膜干燥,化学计量比过低,会导致进入催化层的气体量减少,流道内气体传质作用变弱,均会降低电池性能^[19]。设置化学计量比范围为 10 ~ 90。

2.3.1 电化学性能

电池温度为 80 °C、压强为 0.3 MPa 时极化曲线与功率密度曲线如图 11 所示。随着电池阴极化学计量比从 10 升高到 90,电池电流密度从 1.502 A/cm² 提升至 1.568 A/cm²,功率密度从 0.751 W/cm² 提升至 0.784 W/cm²,均提高了 4.4%,这是由于随着阴极化学计量比的提升,电池内部反应物浓度逐渐提升,反应更加剧烈,电池电流密度和功率密度也随之相应提升。其中,在低电流密度区域,电池处于活化极化损失工作区域,化学计量比的改变对电池活化极化损失影响较小,5 种化学计量比之间的电化学性能差别可以忽略不计。随着电流密度的增加,特别在高电流密度区域,5 种化学计量比下电池的输出性能得到了一定程度的改善,且增加的幅度逐渐增大,在化学计量比为 90 时,电池输出性能最好。

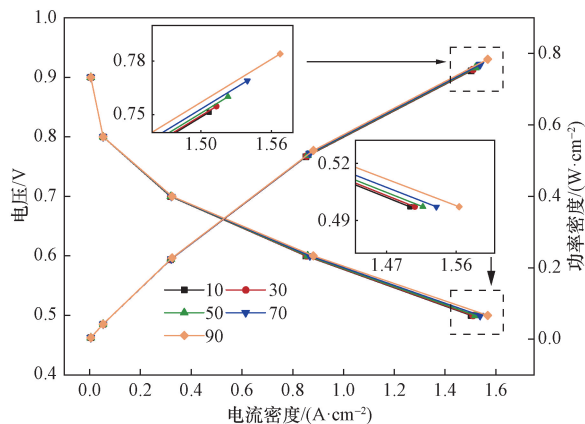


图 11 阴极化学计量比对电池性能影响
Fig. 11 Effect of cathode stoichiometry ratio on battery performance

2.3.2 膜表面温度分布

0.5 V 工作电压下,膜电极表面不同化学计量比下温度分布曲线如图 12(a)所示。从总体上看,随着化学计量比由 10 升高至 90,脊背中线和流道中线截线处膜表面平均温度呈下降趋势,分别下降了 3.9%、1.4%,并且下降幅度逐渐增加,其中影响最大的为脊背中线位置,进出口处温度分布差异十分明显,这是由于化学计量比的提升,使得阴极流道内部反应气体增加,反应程度剧烈,而脊背区处于两个流道中间位置,此处的压强相对于流道内部较高,使得部分气体由高压强的脊背区扩散至低压强的流道内部,降低了此处的温度。

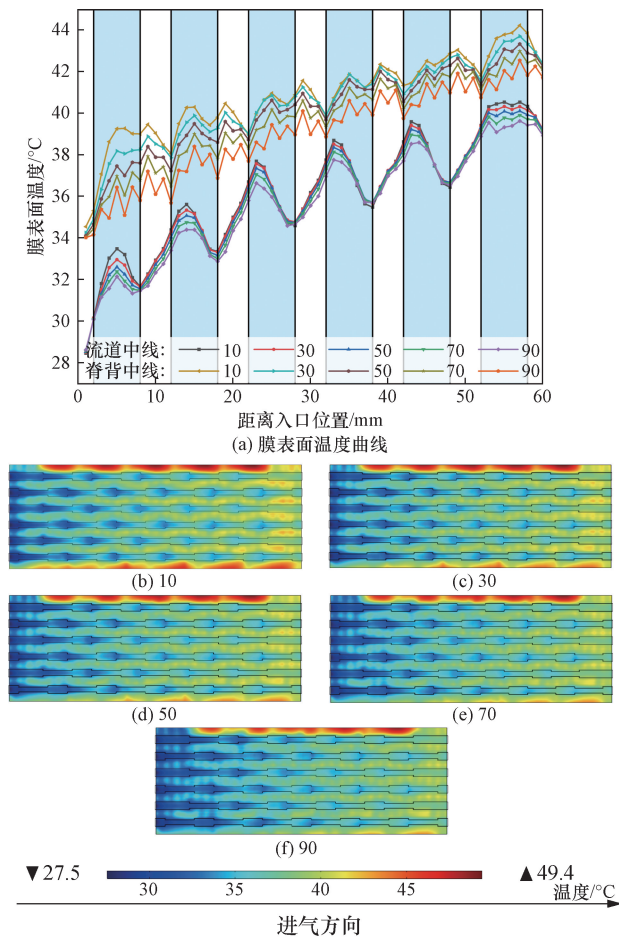


图 12 不同化学计量比膜表面温度分布图。
Fig. 12 Temperature distribution of membrane surface with different stoichiometric ratios

2.3.3 水含量分布

0.5 V 工作电压下,膜电极表面不同截线处水含量分布曲线如图 13(a)所示。从整体上看,随着化学计量比的提高,各截线位置膜表面水含量均有小幅度提升,且流道区域水浓度低于脊背区域,这是因为流道区域空气直接吹扫,生成水更容易排出;流道中线和脊背中线截线处膜表面平均水含量

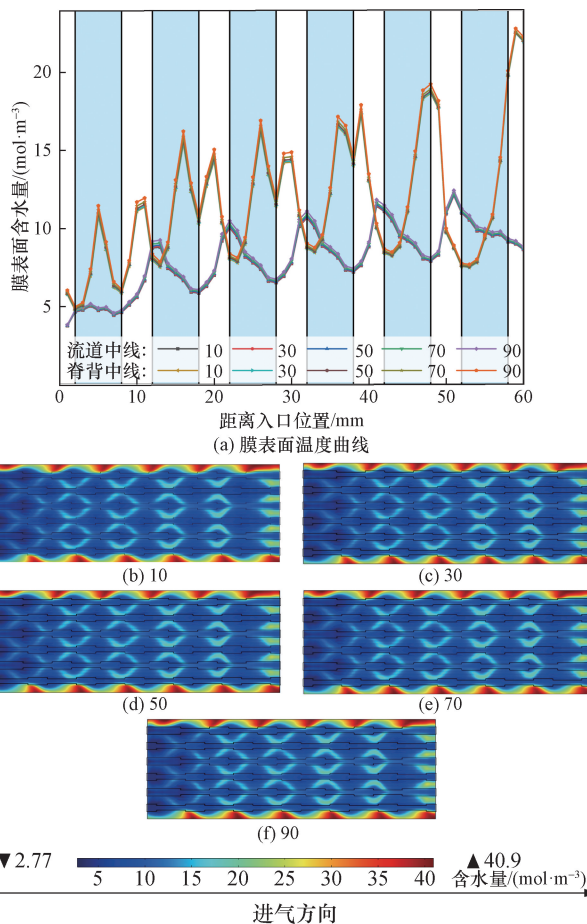


图 13 不同化学计量比膜表面水含量分布图
Fig. 13 Distribution of water content on membrane surface with different stoichiometric ratios

分别提升了 3.5%、3.8%,这是由于化学计量比的提升加剧了反应气体浓度,一部分生成的水不能及时排出,导致膜表面水含量增加。其中,在脊背中线 A 处,沿着流道出口方向,膜表面水含量逐渐增大,且脊背区域水浓度变化呈波浪状变化,这是因为相邻流道侧壁缩型特征交错排列,脊背区域压力不同,使得扩散速率不同而导致;而在流道中线 B 处,膜表面水含量趋于稳定状态。

综上所述,不同化学计量比对电池性能的影响程度与温度相当,对比不同阴极化学计量比下膜表面电流密度、温度、水含量各个参数可以得出:随着阴极化学计量比升高,反应气体浓度增加,膜表面电流密度分布逐渐升高,膜表面温度逐渐降低,电池内部水含量呈增长趋势。总体来看,在较高的化学计量比下,PEMFC 表现出更好的稳定输出性能,因此阴极化学计量比应该控制在 70~90 范围内。

3 输出性能评价

3.1 组合赋权评价方法

以上研究表明,不同操作参数对于侧壁缩型

PEMFC 输出性能的影响程度不一样,为了得到最佳操作参数范围,需要对 PEMFC 输出性能进行综合评价分析。因此,为了能够综合评价最终结果,使用组合赋权的方法,结合层次分析法与熵权法计算不同操作参数下的主客观权重与客观权重,使评价指标的权重一方面能够从主观上反映不同操作参数下各个指标的重要程度,另一方面又能反映指标在数值层面的客观规律。PEMFC 操作参数条件设置如表 5 所示。

表 5 PEMFC 操作参数条件设置

Table 5 PEMFC physical parameters and operating conditions

指标	工作温度	压力	化学计量比
组合 I 操作参数	50 ~ 60	0.1 ~ 0.2	10 ~ 30
组合 II 操作参数	60 ~ 70	0.2 ~ 0.25	50 ~ 70
组合 III 操作参数	70 ~ 80	0.25 ~ 0.3	70 ~ 90

在不同操作参数下参数范围,电池性能的重要程度并不相同,而层次分析法是一个较为主观的评价方法,其在赋权得到权重向量的主观因素占比较大,用于评价电池性能的优先级较为合适,层次分析法的赋权步骤^[20]如下。

步骤 1 根据不同操作参数组合设定所有指标的相对重要性,并按照比例标度 1 ~ 9 对功率密度、电流密度、膜表面温度及膜表面水含量的相对重要性进行逐级打分,比例标度值越高,则前者指标相对于后者指标越重要。

步骤 2 根据标度数值构建不同操作参数组合下的判断矩阵 $J_k (k = I, II, III)$, 表达式如下。

$$J_k = (a_{ij})_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad (1)$$

步骤 3 将各行判断矩阵分值的乘积开 4 次方,得到权重向量 ω_i , 并将权重向量归一化后得到主观权重 α_i 。

$$\begin{cases} \omega_i = \sqrt[4]{\prod_{j=1}^4 a_{ij}}, i = 1, 2, 3, 4 \\ \alpha_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^4 \omega_i} \end{cases} \quad (2)$$

层次分析法在赋权得到权重向量时的主观因素占比较大,常常需要与客观方法得到的权重向量方法进行综合,从而得出一个综合的权重向量并进行后续操作,而熵权法是一种客观赋值方法,在具体使用的过程中,熵权法能够得到较为客观的指标权重。因此,选择熵权法作为客观方法求解权重向量,赋权步骤^[20-22]如下。

步骤 1 指标正向化。

不同的指标代表含义不一样,有的指标越大越好,称为越大越优型指标。有的指标越小越好,为方便评价,应把所有指标转化成越大越优型指标。

有 15 个评价对象,4 个评价指标,构成数据矩阵 X , 表达式为

$$X = (x_{ij})_{15 \times 4} \quad (3)$$

对于膜表面温度、膜表面水含量越小而性能越优的指标有

$$x'_{ij} = \max(x_{ij}) - x_{ij} \quad (4)$$

对于功率密度、电流密度越大而性能越优的指标有

$$x'_{ij} = x_{ij} \quad (5)$$

式中: x_{ij} 为不同装配力下的电池性能指标值, i 为指标数据所在的行 $i = 1, 2, \dots, 15$, j 为数据所在列 $j = 1, 2, 3, 4$ 。

步骤 2 标准化。

每个指标的数量级不一样,把它们化到同一个范围内进行比较, r_{ij} 为标准化后不同操作参数下的电池性能指标值。其中,标准化处理后的数据矩阵为 $R = (r_{ij})_{15 \times 4}$ 。

$$r_{ij} = \frac{x'_{ij} - \min(x'_j)}{\max(x'_j) - \min(x'_j)} \quad (6)$$

步骤 3 计算信息熵。

而对于标准化的任一电池性能指标值,其信息熵 E_j 为

$$\begin{cases} E_j = -\frac{1}{\ln 15} \sum_{i=1}^{15} p_{ij} \ln p_{ij} \\ p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^4 r_{ij}} \end{cases} \quad (7)$$

步骤 4 计算电池输出性能指标客观权重 β_i 。

$$\beta_i = \frac{(1 - E_j)}{\sum_{j=1}^4 (1 - E_j)} \quad (8)$$

在得到主观权重与客观权重之后,计算组合权重 ω_i ^[20], 表达式为

$$\omega_i = \frac{\alpha_i \beta_i}{\sum_{i=1}^4 \alpha_i \beta_i} \quad (9)$$

式(9)中: α_i 为指标 i 的主观权重; β_i 为指标 i 的客观权重。

依照上述方法对不同操作参数下各个指标进行赋权,采用层次分析法确定各个指标的主观权重,通过熵权法确定各个指标的客观权重,最后计算得到不同操作参数下各指标的组合权重如表 6 所示。

表 6 各组合操作参数设置下组合权重

Table 6 Combination weights under each combination of operating parameter settings

组合	指标	主观权重	客观权重	组合权重
组合 I	峰值功率密度	0.466 8	0.157 2	0.325 0
	平均电流密度	0.160 2	0.282 3	0.200 2
	膜表面温度	0.277 5	0.295 5	0.363 1
	膜表面含水量	0.095 2	0.264 8	0.111 6
组合 II	峰值功率密度	0.277 5	0.247 6	0.302 5
	平均电流密度	0.466 8	0.162 6	0.334 2
	膜表面温度	0.095 2	0.184 3	0.077 2
	膜表面含水量	0.160 2	0.405 4	0.285 9
组合 III	峰值功率密度	0.277 5	0.187 5	0.223 3
	平均电流密度	0.466 8	0.238 8	0.478 5
	膜表面温度	0.160 2	0.228 4	0.157 0
	膜表面含水量	0.095 2	0.345 2	0.141 0

3.2 基于改进雷达图法的输出性能评价

为更好地定量分析输出性能优劣,由上述组合赋权法计算得到各个 PEMFC 输出性能评价指标的权重系数 ω_i ,然后建立基于改进雷达图法的综合评价模型,从而定量分析 PEMFC 输出性能的好坏。并引入综合评价函数 H ,综合考虑雷达图面积大小和周长因素, H 的函数值越大表明输出性能越好,其表达式^[23]为

$$H(\delta_1, \delta_2) = \sqrt{\delta_1 \delta_2} \quad (10)$$

$$\delta_1 = \frac{S_{rm}}{S_{uc}} \quad (11)$$

$$\delta_2 = \frac{4\pi S_{rm}}{l^2} \quad (12)$$

式中: S_{rm} 为雷达图的面积; S_{uc} 为单位圆的面积,即为 1; l 为雷达图的周长; δ_1 为雷达图与单位圆的面积比,表示 PEMFC 输出性能接近最优的程度; δ_2 为雷达图与具有相同周长的圆的面积比,表示 PEMFC 输出性能各指标的均衡。

采用改进雷达图综合评价法^[23-24],实现对 PEMFC 输出性能综合评价。以圆心为原点,将评价对象各个评价指标值的归一值对应标注于各指标坐标轴 z_i ,以折线的方式顺次连接 $A、Z_1、B、Z_2、C、Z_3、D、Z_4、A$ 点构成封闭图形区域,绘制雷达图。

基于改进的雷达图生成原理,不同操作参数下的改进雷达图综合评价模型如图 14 所示,各雷达图中的 $\angle AOB、\angle BOC、\angle COD$ 和 $\angle AOD$ 角度分别代表峰值功率密度、峰值电流密度、膜表面温度、膜表面含水量评价指标的组合权重,每个角的角平分线分别对应各评价指标的坐标轴,不同颜色填充区域与各指标坐标轴的交点为该指标的归一化值。基于组合赋权法和改进雷达图综合评价模型,对比 3 种操作参数下的综合评价函数,可以看出 PEMFC 在组合 III 操作参数设置下电池的输出性能最好。

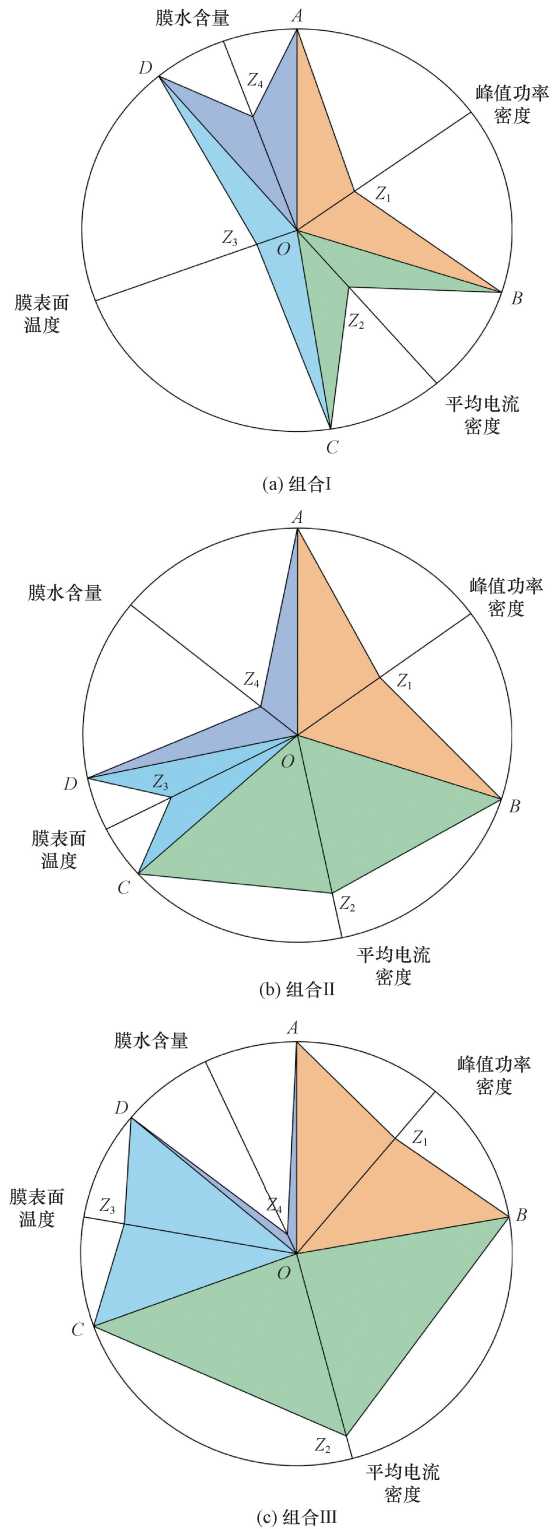


图 14 不同操作参数下的改进雷达图
Fig. 14 Improved radar map with different operating parameters

4 结论

建立了阴极侧壁缩型流道 PEMFC 仿真模型,分析了不同温度、不同压强和不同阴极化学计量比

的操作参数下, 电池电化性能、膜表面温度分布以及含水量分布的变化规律, 结论如下。

(1) 操作参数不变时, 脊背中线、流道中线的电流密度曲线呈脉冲式波动, 膜表面温度曲线、膜表面含水量曲线呈现规律性的波动, 其中脊背中线处的电流密度, 温度, 含水量明显高于流道中线处。

(2) 压强在 0.25 ~ 0.3 MPa 时, 侧壁缩型流道传质性能提升, 反应速率加剧, 电池输出性能提升。但随着反应速率的提升, 电池内部含水量也逐渐提升, 容易存在发生水淹现象。

(3) 电池温度改变对侧壁缩型流道电池输出性能影响较小, 在侧壁缩型流道变截面特征处温度达到局部最高或最低。随着温度的升高, 电池内部反应活化损失降低, 当电池温度在 70 ~ 80 °C, 阴极侧壁缩型流道 PEMFC 性能得到提升。

(4) 阴极化学计量比在 70 ~ 90 时, 阴极侧壁缩型流道表现出更好的输出性能, 且化学计量比为 90 时, 反应物浓度最高, 电化学反应最剧烈, 电池峰值功率密度可达到最高值 0.784 W/cm²。

基于上述研究, 建立了基于组合赋权法和改进雷达图法的 PEMFC 性能综合评价方法, 得到了阴极侧壁缩型流场性能的优选操作参数范围, 在温度 70 ~ 80 °C、压强 0.25 ~ 0.3 MPa、化学计量比 70 ~ 90 的操作参数范围下, 燃料电池阴极侧壁缩型流道表现出良好输出性能。

参 考 文 献

[1] 邵志刚, 衣宝廉. 氢能与燃料电池发展现状及展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 469-477.
Shao Zhigang, Yi Baolian. Developing trend and present status of hydrogen energy and fuel cell development[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 469-477.

[2] Fan L, Tu Z, Chan S H. Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: a review [J]. Energy Reports, 2021, 7: 8421-8446.

[3] Thiyagarajan P K, Jegathanan K, Panthalingam M K, et al. Effect of combinations of different operating parameters on performance of proton exchange membrane fuel cell[J]. Thermal Science, 2021, 25: 2731-2740.

[4] 刘祥荣, 蒋宇, 张雪霞, 等. 质子交换膜燃料电池三维数值仿真研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7352-7369.
Liu Xiangrong, Jiang Yu, Zhang Xuexia, et al. Overview of three-dimensional numerical simulation of proton exchange membrane fuel cells[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2021, 41(21): 7352-7369.

[5] Zhang S, Xu H, Qu Z, et al. Bio-inspired flow channel designs for proton exchange membrane fuel cells: a review[J]. Journal of Power Sources, 2022, 522: 231003.

[6] 刘鑫桐, 刘永峰, 裴普成, 等. 三种运行参数对 PEMFC 动态响

应的数值分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(S1): 238-244.
Liu Xintong, Liu Yongfeng, Pei Pucheng, et al. Numerical analysis of the dynamic response of three operating parameters to PEMFC [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2021, 49(S1): 238-244.

[7] 孙峰, 苏丹丹, 董小平, 等. 阴极压力对质子交换膜燃料电池输出性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(7): 2741-2746.
Sun Feng, Su Dandan, Dong Xiaoping, et al. The influence of cathode pressure on the output performance of proton exchange membrane fuel cell [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(7): 2741-2746.

[8] 李楠, 张瑾辉, 徐瑞阳. 迷宫式新型流道对质子交换膜燃料电池的性能优化[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(8): 3229-3235.
Li Nan, Zhang Jinhui, Xu Ruiyang. Study on performance optimization of a new labyrinth runner for PEMFC [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(8): 3229-3235.

[9] 蒙先攀, 李超, 雷涵, 等. 操作参数耦合对质子交换膜燃料电池性能影响的模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(7): 2711-2718.
Meng Xianpan, Li Chao, Lei Han, et al. Simulation study on the effect of operating parameter coupling on PEMFC performance [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(7): 2711-2718.

[10] Jin L, Wang X J, Zhu J W, et al. Sensitivity analysis of proton exchange membrane fuel cell performance to operating parameters and its applicability assessment under different conditions [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 228: 113727.

[11] Yang Y, Jia H, Liu Z, et al. Overall and local effects of operating parameters on water management and performance of open-cathode PEM fuel cells [J]. Applied Energy, 2022, 315: 118978.

[12] 赵富强, 董洪泉, 田虎刚, 等. 流道构型对 PEMFC 综合性能的影响 [J]. 电源技术, 2023, 47(4): 505-509.
Zhao Fuqiang, Dong Hongquan, Tian Hugang, et al. The influence of channel configuration on the comprehensive performance of PEMFC [J]. Power Technology, 2023, 47(4): 505-509.

[13] Zhao F, Dong H, Tian H, et al. Influence of operation parameters on performance of variable section stepped flow channel fuel cell [J]. Ionics, 2022, 28(4): 1887-1901.

[14] Li C, Xu X, Hu H, et al. Numerical investigation into the effect of serpentine flow channel with a variable cross-section on the performance of proton exchange membrane fuel cell [J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(5): 7719-7731.

[15] Ramin F, Sadeghifar H, Torkavannejad A. Flow field plates with trap-shape channels to enhance power density of polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 129: 1151-1160.

[16] Yang C, Wan Z, Chen X, et al. Geometry optimization of a novel M-like flow field in a proton exchange membrane fuel cell [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 228: 113651.

[17] Liu X, Chen J, Jin L, et al. Sensitivity analysis of current distribution to critical operating parameters for polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2023, 573: 233068.

[18] Jin L, Wang X J, Zhu J W, et al. Sensitivity analysis of proton exchange membrane fuel cell performance to operating parameters

- and its applicability assessment under different conditions[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 228: 113727.
- [19] Yang T F, Sheu B H, Ghalambaz M, et al. Effects of operating parameters and load mode on dynamic cell performance of proton exchange membrane fuel cell[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(2): 2474-2487.
- [20] Ren J, Zhang Q, Zhang Y, et al. Evaluation of slab track quality indices based on entropy weight-fuzzy analytic hierarchy process [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 149: 107244.
- [21] 潘佳煊, 钱孟波, 孙福兴, 等. 基于熵权法的含间隙和柔性的机构定量分析方法及应用[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(19): 40-48.
Pan Jiaxuan, Qian Mengbo, Sun Fuxing, et al. Quantitative analysis method and application of mechanisms with gaps and flexibility based on entropy weight method[J]. *Vibration and Shock*, 2023, 42(19): 40-48.
- [22] Liu X, Tan Z, Yuan Z, et al. Combination weighting-based method for access point optimization of offshore wind farm[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 900-907.
- [23] Wang Q, Guan Z, Zhang B, et al. Multilevel method based on improved radar chart to evaluate acoustic frequency spectrum in periodic pipe structure[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 189: 106878.
- [24] Duan R, Tong J, Sutton A J, et al. Origami plot: a novel multivariate data visualization tool that improves radar chart[J]. *Journal of Clinical Epidemiology*, 2023, 156: 85-94.